

**А. Н. Смирнов**, *ведущ. науч. сотр.*, e-mail: stalevoz@i.ua

**С. В. Куберский\***, *профессор ДГТУ*, e-mail: skubepskiy@yandex.ua

**А. П. Верзилов**, *ведущ. инженер*, e-mail: verzilovalex@gmail.com

**Д. И. Гойда**, *ведущ. инженер*, e-mail: goydadanil@gmail.com

**Ю. Ю. Кулиш**, *инженер I кат.*, e-mail: deathero@gmail.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*Донбасский государственный технический университет, Лисичанск

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ НАПРАВЛЕННЫХ ПОТОКОВ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ МНЛЗ

*Рассмотрены основные приемы организации направленных потоков в промежуточном ковше, что обеспечивает стабильность разливки на МНЛЗ и рафинирование стали. Показано, что для достижения максимальной эффективности удаления неметаллических включений представляется целесообразным использование принудительного перемешивания посредством наложения электромагнитного поля. Наиболее эффективным при этом является двухкамерный промежуточный ковш.*

**Ключевые слова:** непрерывная разливка, промежуточный ковш, неметаллические включения, циркуляционные потоки, электромагнитное перемешивание, индукционный подогрев.

*Розглянуто основні прийоми організації направлених потоків в проміжному ковші, що забезпечує стабільність розливання на МБЛЗ і рафінування сталі. Показано, що для досягнення максимальної ефективності видалення неметалевих включень доцільно використовувати примусове перемішування за допомогою накладання електромагнітного поля. Найбільш ефективним за цих умов є двокамерний проміжний ківш.*

**Ключові слова:** безперервне розливання, проміжний ківш, неметалеві включення, циркуляційні потоки, електромагнітне перемішування, індукційний підігрів.

*The main methods of organizing directed flows in the tundish, which ensures the stability of casting on the continuous casting machine and the refining of steel. It is shown that to achieve maximum removal efficiency of nonmetallic inclusions, it seems reasonable to use forced mixing by applying an electromagnetic field. The most effective in this case is a two-chamber tundish.*

**Keywords:** continuous casting, tundish, nonmetallic inclusions, circulation flows, electromagnetic stirring, induction heating.

Промежуточный ковш является одним из важнейших технологических узлов машины непрерывной разливки стали (МНЛЗ). Его основное предназначение заключается в обеспечении непрерывности процесса разливки посредством создания буферной зоны между сталеразливочным ковшом и кристаллизатором МНЛЗ. Помимо этого в нем происходит распределение металла по кристаллизаторам в случае эксплуатации многоручьевой МНЛЗ, его рафинирование от неметаллических включений, температурное усреднение и химическая гомогенизация, а также возможна реализация дополнительных технологических операций, обеспечивающих нагрев стали и корректировку ее химического состава. Все это позволяет оптимизировать процессы разливки и кристаллизации для получения непрерывнолитых заготовок высокого качества [1].

В основе корректного протекания всех вышеперечисленных процессов лежит рациональная базовая конструкция промежуточного ковша, которая определяется

его технологическим назначением. По совокупности выполняемых технологических операций промежуточные ковши МНЛЗ можно классифицировать на две группы: предназначенные для минимизации производственных издержек путем повышения серийности разливки и для повышения качества металла путем его дополнительного рафинирования, доводки по химическому составу, а также подогрева.

Для промежуточных ковшей первой группы ключевую роль играет организация рационального массопереноса металла от точки падения струи до ручьев путем оптимизации скорости и направления турбулентных потоков стали, возникающих в результате свободного истечения металла из сталеразливочного ковша под действием высокого ферростатического давления. Это в значительной степени зависит от конструкции промежуточного ковша и наличия в нем определенных технологических элементов (порогов, продувочных балок, металлоприемников и т. д.).

В последние 2–3 десятилетия наибольшее применение в промежуточных ковшах получили металлоприемники, устанавливаемые в месте падения струи с целью уменьшения ее кинетической энергии. Однако в таких промежуточных ковшах, как правило, не используются дополнительные элементы, способствующие более глубокому рафинированию стали. В свою очередь, разливка качественных марок стали накладывает свой отпечаток как на конструкцию промежуточного ковша, так и на наличие в нем дополнительных конструктивных элементов [2, 3]. Особенно актуальна эта проблема для слябовых МНЛЗ, включающих промежуточные ковши большой емкости, где можно успешно реализовать часть операций по внепечной обработке, свойственных современным агрегатам ковш-печь и вакууматорам. В первую очередь это относится к дегазации стали, нагреву металла, удалению неметаллических включений и раскислению-легированию элементами с высоким сродством к кислороду и азоту, более поздний ввод которых благоприятно сказывается на их усвоении, а, следовательно, и на чистоте стали.

Поэтому основной целью представленной работы был анализ основных типов конструкции промежуточных ковшей, эксплуатируемых на современных МНЛЗ, и разработка рекомендаций по их усовершенствованию, способствующих повышению чистоты металла и его однородности, а также позволяющих корректировать температуру для эффективной его кристаллизации и обеспечения высокого качества.

Для современных сталеплавильных цехов наибольшее распространение получили промежуточные ковши прямоугольной формы. В частности, для одно- и двухручьевых слябовых МНЛЗ точка падения струи стали и расположение стаканов-дозаторов, как правило, находятся на одной линии.

Основной целью функционирования промежуточных ковшей, предназначенных для рафинирования расплава, является создание гидродинамических условий, препятствующих попаданию неметаллических включений в кристаллизатор, а также способствующих их всплытию к поверхности жидкой ванны и ассимиляции покровным шлаком [3–5].

Для организации рационального движения циркуляционных потоков расплава в промежуточном ковше устанавливают различного рода пороги и перегородки, учитывающие особенности его геометрической формы и требования к качеству металла (рис. 1), а также вдувают инертный по отношению к металлу аргон через специальные продувочные устройства, что способствует эффективному массопереносу неметаллических частиц к поверхности расплава и ассимиляции их шлаком.

Среди основных конструктивных элементов, устанавливаемых в промежуточных ковшах с целью рафинирования металлической ванны, можно выделить две группы приспособлений [1, 5]: элементы, работающие без продувки инертным газом (металлоприемники, перегородки, пороги); элементы, работа которых сопровождается вдуванием в расплав аргона (продувочные балки, пористые блоки, кольцевые фурмы и т. д.).

Элементы первой группы главным образом служат для организации определен-

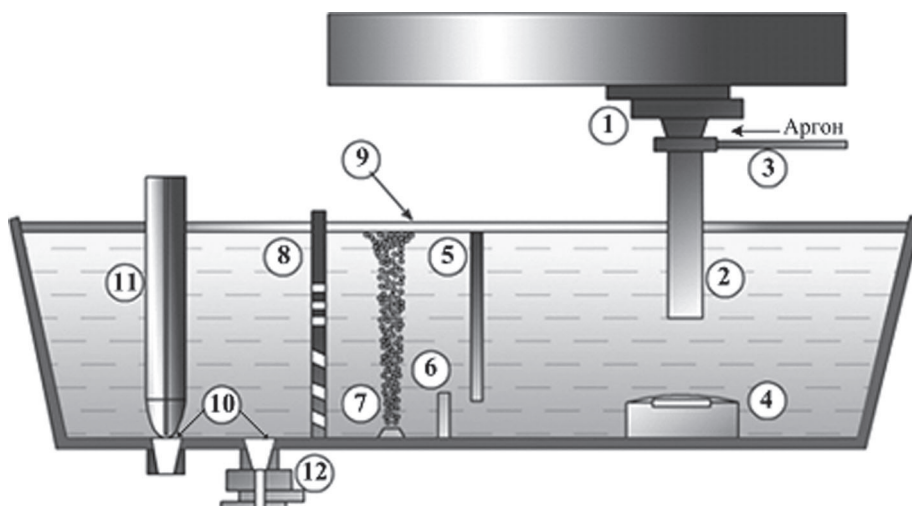


Рис. 1. Общая схема различных решений, применяемых для управления потоками в промежуточном ковше: 1 – шибберный затвор сталеразливочного ковша; 2 – защитная труба; 3 – аргоновая защита; 4 – металлоприемник; 5 – верхняя (шлаковая) перегородка; 6 – порог; 7 – продувочный блок; 8 – фильтрационная перегородка; 9 – теплоизолирующая смесь; 10 – стакан-дозатор; 11 – стопор-моноблок; 12 – трехплитный шибберный затвор

ного направления движения конвективных потоков стали в объеме металлической ванны для ее рафинирования и гомогенизации при условии предотвращения интенсивного их контакта с футеровкой для повышения ее эксплуатационного ресурса.

Перегородки препятствуют прямому попаданию истекающего из сталеразливочного ковша металла в зону дозирующих отверстий промежуточного ковша за счет перенаправления потока в зону раздела фаз металла – теплоизолирующая смесь (ТИС). Это способствует увеличению времени нахождения расплава в промежуточном ковше, повышению эффективности усреднения химического состава и температуры металла, а также удалению неметаллических включений из стали.

Наряду с использованием обычных порогов и перегородок применяются также фильтрационные перегородки. Этот элемент представляет собой плиту, устанавливаемую на всю высоту промежуточного ковша, в которой с целью организации направленного движения потоков металла в объеме ванны выполнены технологические отверстия. Однако, стоит отметить, что на практике фильтрационные перегородки поддаются интенсивному эрозионному износу ввиду высокой кинетической энергии потоков металла. В результате этого выпускные отверстия перегородок размываются и через некоторый промежуток времени перестают выполнять функции, заложенные на этапе их проектирования.

Металлоприемники одновременно выполняют функции приема и торможения потока металла, истекающего из сталеразливочного ковша, защиты места падения струи (бойное место), а также рационального распределения потоков жидкой стали по объему промежуточного ковша. В зависимости от конструктивных особенностей и технологического предназначения металлоприемники можно классифицировать на 2 основных типа: «турбостоп» и «колодец» (рис. 2) [6, 7].

Главная технологическая функция, выполняемая металлоприемником типа «турбостоп», заключается в гашении высокой кинетической энергии падающей струи металла при переливе расплава из сталеразливочного ковша в промежуточный, как правило, при разливке закрытой струей.

Металлоприемники типа «колодец» преимущественно используются при разливке на многоручьевых сортовых МНЛЗ и в большей степени оказывают влияние на нормализацию гидродинамической обстановки в объеме ванны при разливке

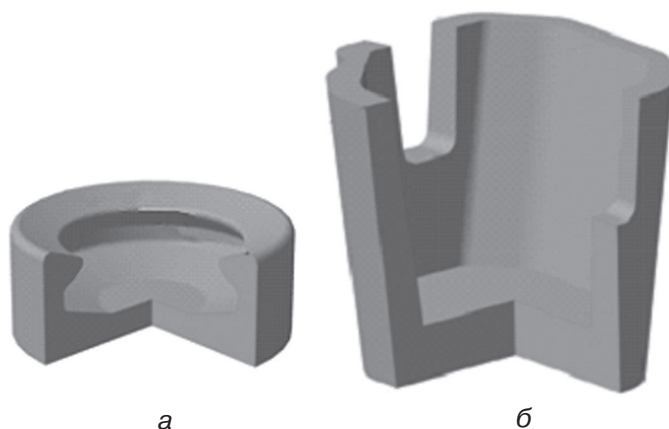


Рис. 2. Общий вид металлоприемников типа «турбостоп» (а) и «колодец» (б)

открытой струей. Они также служат дополнительной защитой вертикальных стенок промежуточного ковша от повышенного износа. Возможность использования металлоприемников такого типа при разливке открытой струей объясняется тем, что их большой внутренний объем не требует строгой фиксации точки падения струи.

Одним из технологических приемов, позволяющих реализовать продувку металлического расплава аргоном в промежуточном ковше, является использование устанавливаемых в днище продувочных балок. Балка устанавливается на всю ширину промежуточного ковша на пути следования металла к стакану-дозатору и, по данным различных исследователей [8, 9], позволяет сократить количество неметаллических включений размером более 50 мкм на 70 %, а включений размером 25–50 мкм – на 40 %. Следует отметить, что недостатком продувочных балок является то, что между аргоновой завесой и стенками промежуточного ковша, выполненными под тупым углом к днищу, образуются застойные зоны, не подвергающиеся перемешиванию, которые могут переносить неметаллические включения в выпускные отверстия промежуточного ковша.

Помимо продувочных балок на практике отмечено использование схемы обработки металла аргоном непосредственно в районе стакана-дозатора. Для этого в днище промежуточного ковша устанавливают специальный стакан-дозатор, оснащенный пористыми вставками, через которые в пузырьковом режиме подается аргон (рис. 3, б) [10]. В качестве продувочных элементов используются корундовые керамические трубки, в которых выполнены тонкие продувочные каналы определенного диаметра. При этом конструкция продувочного блока предполагает, что эти продувочные трубки устанавливаются на определенном расстоянии друг от друга в бетонном кольце, которое сопряжено со стаканом дозатором. Продувочный блок занимает ту же позицию, что и гнездовой блок в традиционной конструкции, а подвод аргона осуществляется с использованием той же продувочной системы, которая предусмотрена в промежуточном ковше.

Помимо рассмотренных выше конструктивных элементов, которые решают задачи повышения эффективности рафинирования, гомогенизации расплава и организации рациональных потоков течения металла внутри промежуточного ковша, существуют альтернативные устройства и методы, также позволяющие решать эти задачи, но не получившие на данный момент широкого распространения. Одним из таких методов является использование электромагнитных воздействий, которые позволяют не только управлять движением потоков стали внутри промежуточного ковша, но и осуществлять ее дополнительный подогрев, а также дозирование в зависимости от производственной необходимости [11–13].

Следует отметить, что использование таких методов имеет определенные

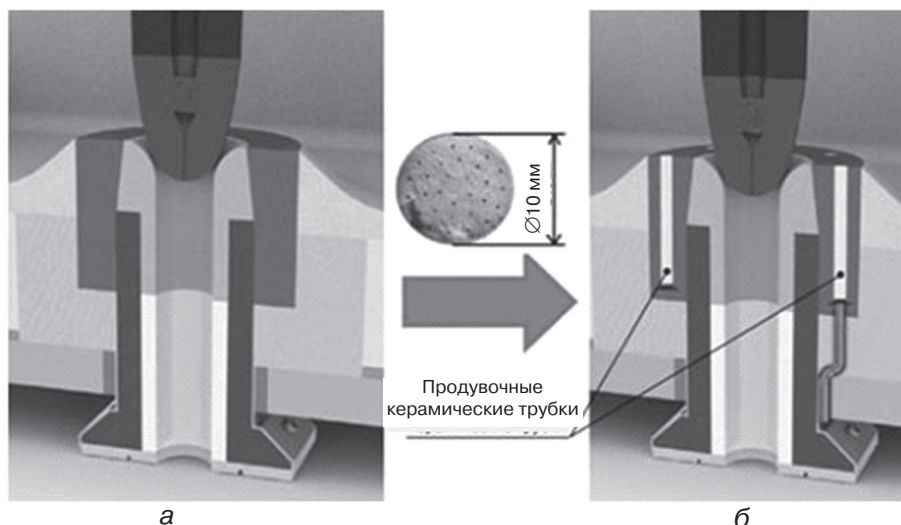


Рис. 3. Схематическое изображение разливочных узлов без продувки аргоном (а) и с кольцевой продувкой (б)

конструктивные ограничения, которые удастся преодолеть посредством создания двухкамерных промежуточных ковшей. При этом для повышения эффективности удаления неметаллических включений и стабильности процесса непрерывной или полунепрерывной разливки (особенно в условиях мини-заводов) представляется целесообразным использовать многофункциональный двухкамерный промежуточный ковш, представленный на рис. 4.

В предложенном промежуточном ковше удаление неметаллических включений происходит преимущественно в камере, имеющей цилиндрическую форму, что позволяет использовать электромагнитное поле для придания жидкой стали направленного вращательного движения. Благодаря принудительному вращательному движению жидкой стали увеличивается резидентное время ее пребывания в промежуточном ковше и, соответственно, возрастает вероятность удаления крупных неметаллических включений за счет центробежного эффекта в результате их всплытия в шлак. Использование промежуточного ковша с вращательным движением потоков позволяет значительно уменьшить количество крупных оксидных включений (размером более 10–15 мкм) в готовой стали. Обработанный таким образом расплав затем подается в рабочую камеру через проточный канал, выполненный в придонной области промежуточного ковша.

Организация вращательного движения потоков с помощью электромагнитного поля в промежуточном ковше имеет ряд существенных преимуществ перед другими методами рафинирования стали, обеспечивая высокую однородность стали по химическому составу и температуре, высокую степень удаления неметаллических включений, надежность в эксплуатации и простоту в обслуживании [14].

Между тем применение электромагнитного воздействия в цилиндрической камере промежуточного ковша требует определенной оптимизации параметров воздействий. Прежде всего, это относится к интенсивности процесса перемешивания (относительного движения циркуляционных потоков) на границе шлак-металл. Интенсивное движение жидкой стали вдоль поверхности слоя теплоизолирующего шлака может приводить к захвату частиц шлака потоками стали. Это представляется тем более вероятным при замене пустого сталеразливочного ковша на полный, поскольку в этот отрезок времени происходит падение уровня в промежуточном ковше. По мнению авторов, принудительное вращательное движение потоков наиболее целесообразно осуществлять в нижней части цилиндрической камеры, что уменьшит вероятность захвата частиц шлака.

Для последующего перетекания стали из цилиндрической камеры в рабочую в



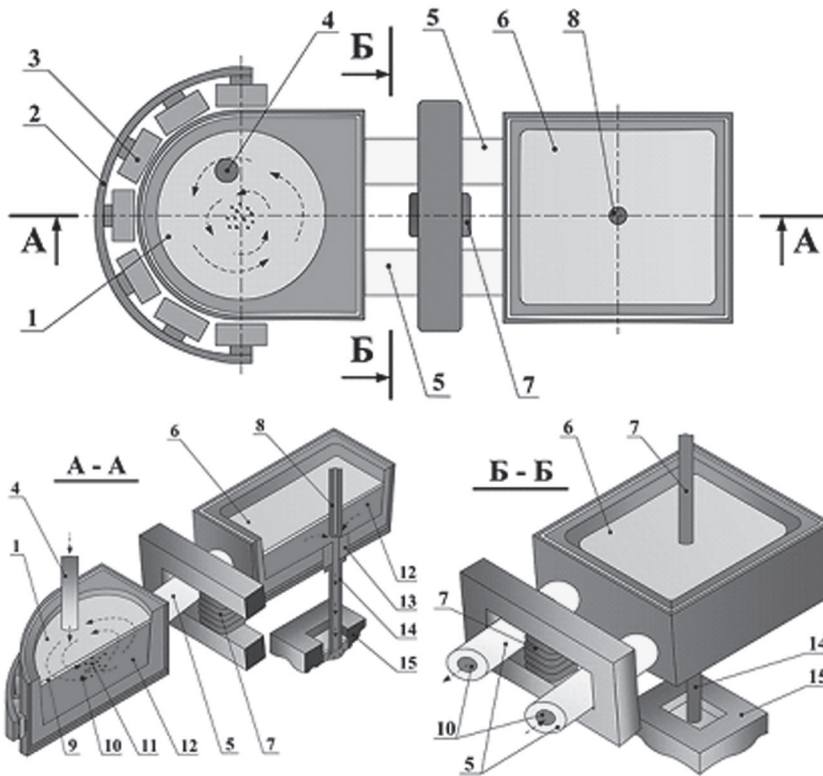


Рис. 4. Двухкамерный промежуточный ковш с электромагнитным перемешивателем для создания вращающегося магнитного поля: 1 – приемная камера; 2 – удерживающее кольцо; 3 – электромагниты; 4 – защитная труба; 5 – каналы; 6 – рабочая камера; 7 – индуктор; 8 – стопор; 9 – теплоизолирующая смесь; 10 – потоки жидкой стали; 11 – неметаллические включения; 12 – жидкая сталь; 13 – стакан-дозатор; 14 – погружной стакан; 15 – кристаллизатор

конструкции промежуточного ковша предусматриваются проточные каналы. Такая схема дает возможность разделения электромагнитной системы промежуточного ковша на две автономные части, обеспечивающие управление гидродинамикой и нагревом металла, что позволяет более эффективно управлять этими процессами. При этом проточные каналы двухкамерного промежуточного ковша оснащены индукционными нагревательными устройствами, которые позволяют подогревать сталь в процессе ее перетекания из одной камеры в другую и в несколько раз снизить колебания температуры в процессе непрерывной разливки. Кроме того, в рабочей камере дополнительно формируются восходящие конвективные потоки, способствующие всплытию и удалению неметаллических включений, количество которых уменьшается в несколько раз.

Следует отметить, что потоки стали в промежуточном ковше с индукционным подогревом представляют достаточно сложную гидродинамическую систему, на которую значительное влияние оказывают электромагнитные силы, тепловая конвекция, конфигурация каналов и т. д. Наблюдаемое в рассмотренном промежуточном ковше течение жидкой стали вверх следует связывать с эффектом всплытия более горячих и опускания более холодных объемов металла. Все это способствует выравниванию температурного поля, а тепло, выделяющееся в результате индукционного нагрева стали, в максимальной степени повышает температуру металла вблизи устьев канала, являющегося зоной тепловыделения, то есть предотвращается локальный

перегрев всего расплава в канале, а перегретые его объемы отводятся в ванну промежуточного ковша.

Обобщая рассмотренные возможности предлагаемой конструкции многофункционального промежуточного ковша, следует отметить, что такой промежуточный ковш фактически обеспечивает выполнение всех основных технологических операций, которые для традиционных МНЛЗ обеспечиваются при обработке стали на агрегате «ковш-печь». Более того, при разливке стали небольшими порциями (5–50 т) на одноручевых непрерывных или полунепрерывных машинах представляется возможным перенос всех основных операций по доводке стали непосредственно в промежуточный ковш. При этом операции по доводке стали в ковше минимизируются и ограничиваются раскислением и легированием. Фактически в этом случае промежуточный ковш, выполняя операции рафинирования стали, обеспечит разливку высококачественных марок стали.

### Выводы

- На характер движения потоков в промежуточном ковше оказывает влияние геометрия промежуточного ковша, а также технологические приспособления, которые реализуют стратегию работы металлургического предприятия: минимизация издержек и разливка рядового сортамента сталей или разливка качественных марок сталей с использованием дорогостоящих элементов управления потоками в промежуточном ковше, а также устройств для рафинирования и подогрева металла.

- Установка порогов, фильтрационных перегородок и металлоприемников главным образом преследует цель организации движения конвективных потоков стали в объеме металлической ванны, что в свою очередь способствует повышению эксплуатационного ресурса футеровки промежуточного ковша. Существование такого рода решений обычно сводится к организации движения конвективных потоков таким образом, чтобы предотвратить интенсивный их контакт с футеровкой и интенсифицировать удаление неметаллических включений из расплава. Использование продувки аргоном посредством пористых блоков, балок и кольцевых фурм преследует цель дополнительного удаления неметаллических включений из стали и повышения качества отливаемых непрерывнолитых заготовок. Продувка ванны аргоном способствует удалению неметаллических включений из разливаемого металла. Помимо этого продувка инертным газом способствует температурному усреднению расплава и его химической гомогенизации

- Для повышения эффективности удаления неметаллических включений и стабильности процесса непрерывной или полунепрерывной разливки (особенно в условиях минизаводов) представляется целесообразным использовать многофункциональный двухкамерный промежуточный ковш. При этом удаление неметаллических включений происходит преимущественно в камере, имеющей цилиндрическую форму, что позволяет использовать электромагнитное поле для придания жидкой стали направленного вращательного движения.



### Список литературы

1. Смирнов А. Н. Непрерывная разливка стали / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
2. Найдек В. Л. Моделирование гидрогазодинамических процессов в полости промежуточного ковша машины непрерывной разливки стали / В. Л. Найдек, Н. И. Тарасевич, Б. С. Гончар, В. В. Белоусов, В. Ф. Комаров // Доповіді Національної академії наук України. – 2009. – № 5. – С. 73–77.
3. Sahai Y. Tundish Technology for Clean Steel Production / Y. Sahai, T. Emi // New Jersey: World Scientific. – 2008. – pp. 316.

4. Wolf M. Advanced tundish metallurgy in slab casting / M. Wolf // Proceedings 2-nd Conference on Continuous Casting of Steel in Developing Countries: October 28-31. – Wuhang, China, 1997. – pp. 316–323.
5. McLean A. The Turbulent Tundish–Contaminator or Refiner? / Proceedings Steelmaking Conference // Iron and Steel Society. – V. 71. – 1988. – pp. 3–23.
6. Смирнов А. Н. Совершенствование конструкции металлоприемника промковша для разливки стали сверхдлинными сериями / А. Н. Смирнов, А. В. Кравченко, С. Г. Соловых // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 7. – С. 229–231.
7. Zhong L. Fluid flow in a four-strand bloom continuous casting tundish with different flow modifiers / L. Zhong, B. Li, Y. Zhu, R. Wang, W. Wang, X. Zhang. — *ISIJ International*, 2007. – № 1. – pp. 88–94.
8. Zhong L. C. Fluid flow behavior in slab continuous casting tundish with different configurations of gas bubbling curtain / L. Y. Li, B. Wang, L. Zhang, L. X. Zhu, Q. F. Zhang // *Ironmaking and Steelmaking*. – 2008. – Vol. 35. – No. 6. – pp. 436–440.
9. Ефимова В. Г. Удаление неметаллических включений при продувке металла инертным газом через продувочные блоки в промежуточном ковше МНЛЗ / В. Г. Ефимова // *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. – 2013. – № 1 (16) – 2 (17). – С. 51–61.
10. Смирнов А. Н. Рафинирование стали в промковше слябовой МНЛЗ при продувке аргоном через кольцевую пористую фурму / А. Н. Смирнов, В. Г. Ефимова, А. В. Кравченко, К. Е. Писмарев // *Сталь*. – 2013. – № 12. – С. 14–21.
11. Rajneesh C. Electromagnetic devices for continuous steel casting tundishes / C. Rajneesh, K. Ravikumar, S. Martin et al. // *Proceedings 8-th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials (EPM 2015)*. Canne, France, October 12–16, 2015. – Simar Laboratory, 2015. – pp. 361–364.
12. Gong W. Research on Induction Heating Apparatus of Tundish / Z. Jiang, D. Zhan, X. Yang // *Jornal Iron and Steel Research International*. – 2012. – Vol. 19. October. – pp. 726–731.
13. Miki Yu. Applications of MHD to continuous casting of steel // *The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2006»*. Sendai, Japan, October 23–27. – 2006. – pp. 26–30.
14. Miki Yu. Development of the centrifugal flow tundish for separation of inclusions from molten steel in continuous casting / Yu. Miki, T. Fujii, H. Kitaoka et al. // *Magnetohydrodynamics*. – 1997. – Vol. 33. – № 4. – pp. 380–385.



## References

1. Smirnov, A. N., Kuberskij, S. V., Shtepan, E. V. (2011) Nepreryvnaya razlivka stali [*Continuous casting of steel*]. Donetsk: DonNTU, 482 p. [in Russian].
2. Najdek, V. L., Tarasevich, N. I., Gonchar, B. S., Belousov, V. V., Komarov, V. F. (2009) Modelirovanie gidrogazodinamicheskikh protsessov v polosti promezhutochnogo kovsha mashiny nepreryvnoy razlivki stali [*Modeling of hydro-gas dynamic processes in the cavity of the intermediate ladle of the continuous casting machine*]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, no. 5, pp. 73–77. [in Russian].
3. Sahai, Y., Emi, T. (2008) *Tundish Technology for Clean Steel Production*. New Jersey: World Scientific, p. 316. [in English].
4. Wolf, M. (1997) Advanced tundish metallurgy in slab casting. *Proceedings 2-nd Conference on Continuous Casting of Steel in Developing Countries: October 28–31*. Wuhang, China, R. 316–323. [in English].
5. McLean, A. (1988) The Turbulent Tundish–Contaminator or Refiner? *Proceedings Steelmaking Conference*. Iron and Steel Society, vol. 71, pp. 3–23. [in English].
6. Smirnov, A. N., Kravchenko, A. V., Solovykh, S. G. (2010) Sovershenstvovanie konstruksii metalopriemnika promkovsha dlya razlivki stali sverkhdlinnymi seriyami [*Perfection of the construction of a tundish metal receiver for casting steel with super-long series*]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, no. 7, pp. 229–231. [in Russian].
7. Zhong, L., Li, B., Zhu, Y., Wang, R., Wang, W., Zhang, X. (2007) Fluid flow in a four-strand bloom



- continuous casting tundish with different flow modifiers. *ISIJ International*, no. 1, R. 88–94. [in English].
8. Li, L. Y., Wang, B., Zhong, L., Zhu, L. X., Zhang, Q. F. (2008) Fluid flow behavior in slab continuous casting tundish with different configurations of gas bubbling curtain. *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 35, no. 6, pp. 436–440. [in English].
  9. Efimova, V. G. (2013) Uдалenie nemetallicheskih vklyucheniy pri produvke metalla inertnym hazom cherez produvochnye bloki v promezhutochnom kovshe MNLZ [*Removal of non-metallic inclusions when the metal is blasted with inert gas through the blowing blocks in the intermediate ladle of the continuous casting machine*]. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, no. 1 (16) – 2 (17), pp. 51–61. [in Russian].
  10. Smirnov, A. N., Efimova, V. G., Kravchenko, A. V., Pismarev, K. E. (2013) Rafinirovanie stali v promkoshe slyabovoy MNLZ pri produvke argonom cherez koltsevuyu poristuyu furmu [*Refining of steel in the production of slab CCM with argon blowing through an annular porous tuyere*]. *Stal*, no. 12, pp. 14–21. [in Russian].
  11. Rajneesh, C., Ravikumar, K., Martin, S. et al. (2015) Electromagnetic devices for continuous steel casting tundishes. *Proceedings 8-th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials (EPM 2015)*. Canne, France, October 12–16, 2015. Simar Laboratory, pp. 361–364. [in English].
  12. Jiang, Z., Zhan, D., Yang, X. (2012) Research on Induction Heating Apparatus of Tundish. *Jornal Iron and Steel Research International*, vol. 19, October, pp. 726–731. [in English].
  13. Miki, Yu. (2006) Applications of MHD to continuous casting of steel. *The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2006»*. Sendai, Japan, October 23–27, 2006, pp. 26–30. [in English].
  14. Miki, Y., Fujii, T., Kitaoka, H. et al. (1997) Development of the centrifugal flow tundish for separation of inclusions from molten steel in continuous casting. *Magnetohydrodynamics*, vol. 33, no. 4, pp. 380–385. [in English].

Поступила 10.08.2017